DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.178 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于虚拟同步机的构网逆变器三相不平衡功率波动抑制

刘家文[1,2]，侯川川[2](中国电源学会会员)，朱 淼[2](中国电源学会高级会员)，
龚逊东[3]，杨 晨[3]
(1.上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，
上海 200240；3.国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司，苏州 215100)

摘要：在以“双高”为特征的新型电力系统中，虚拟同步机VSG(virtual synchronous generator)技术因具备惯量和频率的自然响应能力而被广泛应用于逆变器的构网型控制中。当电网电压处于不平衡状态时，基于现有VSG的并网逆变器馈入功率将包含二倍频波动。为此，基于VSG提出1种三相不平衡下的虚拟电压、电流调控策略。通过对逆变器功率波动机理和跟网型虚拟相电流调控VPCR(virtual phase-current regulation)方法的分析，指出现有VPCR无法解决构网型控制下的功率波动问题。结合VSG的构网型控制特性，在现有VPCR的基础上提出虚拟电压电流协同调控的功率波动抑制策略。该方法仅需调节电压、电流反馈系数，不需额外增加控制回路或进行正负序分离，充分保留VSG的控制特征和构网型属性，能够有效抑制电压不平衡下的功率波动。实验结果证实了所提功率波动抑制策略的可行性。

关键词：虚拟同步机；电压不平衡；功率波动；虚拟电压电流调节；构网型控制

Three-phase Unbalanced Power Fluctuation Suppression of Grid-forming Inverter Based on VSG

LIU Jiawen[1,2], HOU Chuanchuan[2], *Member*, *CPSS*, ZHU Miao[2], *Senior Member*, *CPSS*,
GONG Xundong[3], YANG Chen[3]
(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215100, China)

Abstract: In a new power system characterized by a “dual-high” structure, the virtual synchronous generator(VSG) technology has been widely applied in the grid-forming control of inverters owing to its inherent response capability to inertia and frequency variations. When the grid voltage is unbalanced, the power injected by grid-connected inverters based on the conventional VSG will include second-harmonic fluctuations. To address this issue, a virtual voltage and current regulation strategy under three-phase unbalanced conditions based on VSG is proposed. Through the analysis of the mechanism of inverter power fluctuations and the virtual phase-current regulation (VPCR) method used in grid-following control, it is pointed out that the existing VPCR method cannot solve the power fluctuation problem under grid-forming control. With the combination of grid-forming control characteristics of VSG, a power fluctuation suppression strategy is proposed, which integrates virtual voltage and current regulation on the basis of the existing VPCR method. This approach only requires adjusting the voltage and current gain coefficients, without the need for additional control loops or positive-negative sequence separation, thereby fully preserving the control characteristics and grid-forming attributes of VSG. The proposed method can effectively suppress power fluctuations under voltage imbalance.

收稿日期：2025-03-28；**修回日期**：2025-05-13，2025-06-09；
录用日期：2025-06-17；**网络首发日期**：2025-07-01
基金项目：国家电网有限公司科技资助项目(SGJSSZ00KJJS2312931)
This work is supported by State Grid Corporation of China Technology Project under the grant SGJSSZ00KJJS2312931

Experimental results verified the feasibility of the proposed power fluctuation suppression strategy.

Keywords: Virtual synchronous generator (VSG); voltage imbalance; power fluctuation; virtual voltage-current control; grid-forming control

近年来，我国持续推进能源结构转型升级，风、光等新能源发电占比显著提升，预计到 2060 年，我国风光能源装机容量和发电量占电力装机总容量和总发电量的比重将分别超过 85.0%和 69.2%[1-2]。然而，随着新能源渗透率的不断提高，基于电力电子设备的分布式电源因缺乏惯量阻尼特性，将导致电力系统稳定性面临严峻挑战[3]。虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)技术通过模拟同步发电机的外特性，为分布式电源提供了惯量支撑与阻尼调节能力，有效缓解了高比例新能源接入引发的系统频率与电压失稳问题，增强了分布式电源对电网频率和电压的支撑能力[4]。

尽管国内外学者已经围绕 VSG 开展了大量研究，但现有成果多数是针对三相电网电压平衡的场景，如 VSG 参数自适应控制[5-6]和电网电压对称跌落下的 VSG 功角稳定控制[7]等。然而在实际运行场景中，配电网电压因不平衡负载、短路故障及非全相运行等因素，常出现三相不平衡工况。此时基于 VSG 控制的逆变器将面临输出并网电流畸变、并网有功/无功功率二倍频波动等突出问题[8-9]。为了解决这一问题，有必要对电压不平衡下的逆变器 VSG 控制策略进行改进，以保障电力系统的安全稳定。

针对电网电压不平衡引发的构网型 VSG 输出功率波动问题，现有研究主要形成 2 类技术路线。第一类是基于电流正负序分离控制。文献[10]采用正序电流环控制逆变器输出三相平衡电流，但并未完全消除功率波动；文献[11-12]进一步引入负序电流环，通过正负序双环协同控制实现功率波动抑制；文献[13-15]尝试采用李雅普诺夫能量函数增广控制、模型预测控制等先进算法提升控制性能，但计算复杂度高，工程实用性不足。这类方法的缺点较为明显：正负序分离过程需要使用滤波器等模块，分离后仍需其他附加控制器，计算量大且控制参数多，不利于电力系统的安全稳定运行。

第二类技术路线聚焦谐波电流补偿策略。文献[16-18]利用谐波电流补偿方法，将 VSG 电流环控制分为基波支路与谐波支路，在电网电压不平衡时动态调整逆变器输出电流中的谐波分量以抑制功率波动，但其电流计算过程复杂，需进行谐波提取；文献[19]提出基于拓展功率的 VSG 策略，附加谐振控制环以实现抑制功率波动等控制目标。此类谐波补偿方法虽省去了正负序分离环节，在一定程度上简化了控制结构，但是其多目标之间协同调节也提高了系统运行控制环节的复杂程度。

值得注意的是，上述研究主要针对基于 VSG 控制的构网型逆变器，而在基于锁相环的跟网型逆变器系统中，同样也面临电网电压不平衡引起的功率波动问题。针对跟网型逆变器，文献[20]提出基于虚拟相电流调节 VPCR(virtual phase-current regulation)的控制方法，通过补偿电压跌落相对应电流抑制逆变器的交流侧功率波动，无需正负序分离及附加控制回路，结构简单，但其实际功率波动抑制效果不足，理论模型有待改进。文献[21-22]进一步修正了 VPCR 理论模型，并扩展至逆变器直流侧功率波动抑制，但其研究对象为跟网型系统，尚未涉及 VSG 构网型逆变器的适配性问题。

因此，针对电压不平衡场景下的逆变器输出功率波动抑制问题，现有研究主要存在以下薄弱之处：

(1)电流正负序分离方法依赖滤波器或延时补偿模块，导致逆变器动态响应性能下降，削弱电网快速扰动下的逆变器响应速度；

(2)谐波电流补偿方法需处理复杂的多目标优化问题，控制环路的参数整定与谐波提取过程计算复杂；

(3)VPCR 技术虽具有控制结构简单、易于实现的优势，但仅适用于跟网型逆变器，针对基于 VSG 控制的构网型逆变器，尚无相关研究。

综上，本文在分析电网电压不平衡条件下 VSG 逆变器输出功率波动机理的基础上，结合构网型 VSG 控制结构特点，提出了 1 种虚拟电压电流调节策略。该策略首先基于同步电机定子电压方程引入虚拟电压系数，动态修正电流参考值，以抵消电网负序电压对功率的影响；其次，引入虚拟电流系数，对逆变器输出电流波形进行调控，通过主动注入可控的不对称电流分量，实现对功率二倍频波动的有效抑制；最后，通过 RT-LAB 实验平台和硬件平台对所提虚拟电压电流调节策略的有效性进行验证。

1 电压不平衡下 VSG 功率波动机理

为了便于后文的模型构建与技术分析，本节首先对不平衡电网电压工况下的 VSG 逆变器输出功率波动机理进行阐述。

设并网点三相不平衡电网电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 和电流 $\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}}$ 分别表示$[u_{\mathrm{a}}\ u_{\mathrm{b}}\ u_{\mathrm{c}}]^{\mathrm{T}}$和$[i_{\mathrm{a}}\ i_{\mathrm{b}}\ i_{\mathrm{c}}]^{\mathrm{T}}$，根据对称分量法可将其分解为正负零序分量。由于本系统采用三相三线制结构，电网电压不平衡工况下，零序电流无流通路径，因此在主电路中不考虑零序分量因素，此时三相电压和电流可表示为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{a}}=U_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{p}})+U_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}) \\ u_{\mathrm{b}}=U_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{p}}-2\pi/3)+ \\ \quad U_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}+2\pi/3) \\ u_{\mathrm{c}}=U_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{p}}+2\pi/3)+ \\ \quad U_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}-2\pi/3) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} i_{\mathrm{a}}=I_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{p}})+I_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{n}}) \\ i_{\mathrm{b}}=I_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{p}}-2\pi/3)+ \\ \quad I_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{n}}+2\pi/3) \\ i_{\mathrm{c}}=I_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{p}}+2\pi/3)+ \\ \quad I_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{n}}-2\pi/3) \end{cases} \tag{2}$$

式中：U_{p}、U_{n}和I_{p}、I_{n}分别为电压和电流的正、负序分量幅值；$\theta_{u\mathrm{p}}$、$\theta_{u\mathrm{n}}$和$\theta_{i\mathrm{p}}$、$\theta_{i\mathrm{n}}$分别为电压和电流正、负序分量的初始相位。对其进行 Clark 变换至 $\alpha\beta$ 坐标系下，具体为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} U_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{p}})+U_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}) \\ U_{\mathrm{p}}\sin(\omega t+\theta_{u\mathrm{p}})-U_{\mathrm{n}}\sin(\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I_{\mathrm{p}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{p}})+I_{\mathrm{n}}\cos(\omega t+\theta_{i\mathrm{n}}) \\ I_{\mathrm{p}}\sin(\omega t+\theta_{i\mathrm{p}})-I_{\mathrm{n}}\sin(\omega t+\theta_{i\mathrm{n}}) \end{bmatrix} \tag{4}$$

根据瞬时功率理论可知，有功功率可表示为

$$P=\frac{3}{2}(u_\alpha i_\alpha+u_\beta i_\beta)=\frac{3}{2}(P_1+P_2) \tag{5}$$

$$\begin{cases} P_1=U_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}\cos(\theta_{u\mathrm{p}}-\theta_{i\mathrm{p}})+ \\ \quad U_{\mathrm{n}}I_{\mathrm{n}}\cos(\theta_{u\mathrm{n}}-\theta_{i\mathrm{n}}) \\ P_2=U_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{n}}\cos(2\omega t+\theta_{u\mathrm{p}}+\theta_{i\mathrm{n}})+ \\ \quad U_{\mathrm{n}}I_{\mathrm{p}}\cos(2\omega t+\theta_{u\mathrm{n}}+\theta_{i\mathrm{p}}) \end{cases} \tag{6}$$

根据式(5)和式(6)可知，当电网电压不平衡时，负序分量的存在使得 VSG 逆变器的输出功率包含了直流分量和二倍频波动分量。即使改变控制方式消除了电流负序分量，电压负序分量也不为 0，仍会使逆变器输出功率出现波动，波动幅度与电压负序分量幅值成正比。

因此，为了抑制电压三相不平衡下的功率波动，需要改变控制方式使 VSG 逆变器输出可控的不对称电流，进而抵消电网电压不平衡带来的影响。

2 跟网型控制下的 VPCR 技术功率波动抑制机理

跟网型变流器通过锁相环将并网点相位信息作为参考，从而实现对电网的“跟随”，整体上对外表现为电流源特性[23]。本节基于 VPCR 原理与三相三线跟网型逆变器的控制特征，阐明 VPCR 技术调控电流实现跟网型逆变器在不平衡电网电压下的功率波动抑制原理。

图 1 为跟网型控制方式下 VPCR 功率波动的抑制原理。当跟网型系统发生电压不平衡时，逆变器输出电流需要满足特定的相位、幅值才能实现抑制功率波动。因此，VPCR 技术通过在控制回路中引入虚拟相电流增益来调节不对称电流的相位和幅值，补偿对应电压跌落相的电流，使跟网型逆变器

输出可控的三相不对称电流，从而在功率层面抵消电压不平衡的影响。

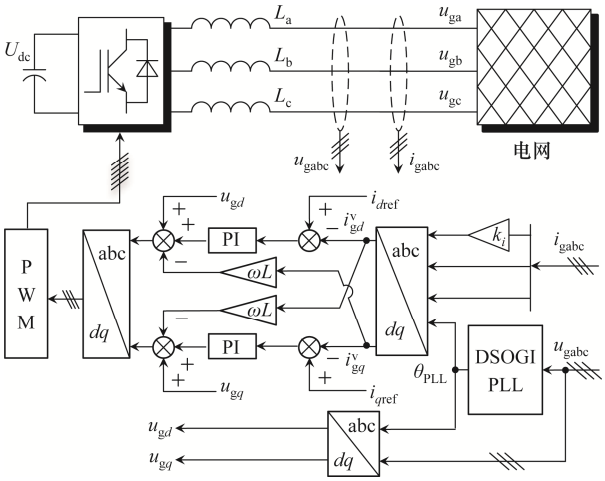


图 1　三相不平衡下跟网型逆变器功率波动抑制原理

Fig. 1 Principle of power fluctuation suppression for grid-following inverter under three-phase imbalance

当 a 相发生电压跌落且跌落比为 k_a($0<k_a<1$)时，VPCR 技术引入虚拟相电流增益 k_i 对三相并网电流进行调控，将采样获得的 a 相电流放大 k_i 倍，再进行 Park 变换得到 dq 轴虚拟电流 i_{gd}^v 和 i_{gq}^v 用于追踪 dq 轴的参考电流 i_{dref} 和 i_{qref}。

此时三相电压为

$$\begin{cases} u_a = k_a U\cos(\omega t) \\ u_b = U\cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U\cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \tag{7}$$

式中，U 为电网电压幅值。对式(7)进行坐标变换至 dq 坐标系下为

$$\begin{cases} u_d = \dfrac{k_a+2}{3}U + \dfrac{k_a-1}{3}U\cos(2\omega t) \\ u_q = \dfrac{-k_a+1}{3}U\sin(2\omega t) \end{cases} \tag{8}$$

根据文献[22]提出的 VPCR 修正模型可知，补偿后的三相并网电流应为

$$\begin{cases} i_a = \dfrac{3}{1+2k_i} I\cos(\omega t + \theta_i) \\ i_b = I\cos(\omega t + \theta_i - 2\pi/3) + \\ \quad \dfrac{k_i-1}{1+2k_i} I\cos(\omega t + \theta_i) \\ i_c = I\cos(\omega t + \theta_i + 2\pi/3) + \\ \quad \dfrac{k_i-1}{1+2k_i} I\cos(\omega t + \theta_i) \end{cases} \tag{9}$$

此时的电流 dq 轴分量为

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{k_i+2}{2k_i+1} I\cos\theta_i + \dfrac{1-k_i}{2k_i+1} I\cos(2\omega t + \theta_i) \\ i_q = \dfrac{k_i+2}{2k_i+1} I\sin\theta_i + \dfrac{k_i-1}{2k_i+1} I\sin(2\omega t + \theta_i) \end{cases} \tag{10}$$

根据瞬时功率理论计算有功功率为

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \\ &\frac{3UI}{4k_i+2}[(k_a - k_i)\cos(2\omega t + \theta_i) + \\ &(k_a + k_i + 1)\cos\theta_i] \end{aligned} \tag{11}$$

取 $k_i = k_a$ 可得

$$P = \frac{3}{2} UI\cos\theta_i \tag{12}$$

式(12)中逆变器输出的有功功率为恒定值，二倍频分量得到有效抑制，且功率数值与电网对称时一致。由式(11)可看出，VPCR 可针对不同电压跌落程度调整虚拟相电流增益 k_i 的取值，确保 $k_i = k_a$ 时能够抑制功率波动。在三相三线制跟网型系统中，VPCR 通过调整单相电流反馈系数使三相电流均发生变化，从而抵消由电压不平衡引起的影响，达到抑制功率波动的目的。

在分析三相不平衡下跟网型逆变器功率波动抑制原理时，其电流环中所需的电压控制矢量由锁相环生成，且 dq 轴参考电流 i_{dref} 和 i_{qref} 直接给出。然而构网型逆变器系统的控制策略与之不同，其电压控制矢量通过功率外环调节机制自主生成，参考电流的取值也由电压环计算得到。在这种差异下 VPCR 是否仍适用于构网型系统则需进一步分析。

3　基于 VSG 的逆变器功率波动抑制

构网型逆变器通过与电网的功率交换来调整参考电压的频率与电网同步，整体对外表现为电压源特性[23]。其控制过程无需锁相环，具备自主构建电压、频率的能力，可应用于弱电网甚至孤网场景中，提供稳定的交流电压。VSG 控制是构网型逆变器较为常见的控制方式之一。

本节针对三相三线制构网型 VSG 逆变器，提

出虚拟电压电流调节控制策略，以实现构网型 VSG 在电网电压不平衡下的功率波动抑制。

3.1 VSG 基本原理

经典的三相三线制 VSG 拓扑如图 2 所示。

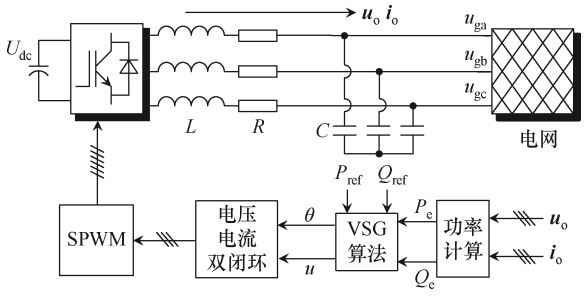


图 2 构网型 VSG 逆变器拓扑

Fig. 2 Topology of grid-forming VSG inverter

图中：U_{dc} 为直流侧电压；L、C 分别为滤波器的电感和电容；$\boldsymbol{u}_o=[u_{oa}\ u_{ob}\ u_{oc}]^T$ 为构网逆变器的输出电压；$\boldsymbol{i}_o=[i_{oa}\ i_{ob}\ i_{oc}]^T$ 为逆变器的输出电流；u_{ga}、u_{gb}、u_{gc} 为三相电网电压；P_{ref}、Q_{ref} 分别为有功功率、无功功率参考值；P_e、Q_e 分别为逆变器输出的有功功率、无功功率；θ、u 分别为经过 VSG 控制算法后得到的逆变器输出端口电压的参考相位和幅值。

VSG 控制框图如图 3 所示。

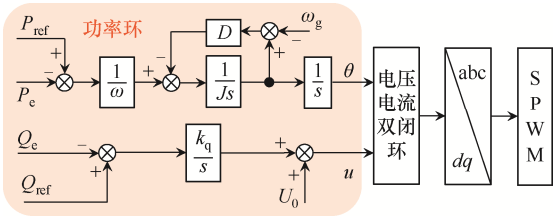


图 3 构网型 VSG 逆变器控制框图

Fig. 3 Control block diagram of grid-forming VSG inverter

逆变器输出电压的相位由有功-频率控制环得到，其数学模型可表示为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{P_{ref}}{\omega}-\dfrac{P_e}{\omega}-D(\omega-\omega_g) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \end{cases} \tag{13}$$

式中：J 为虚拟转动惯量；D 为阻尼系数。

逆变器输出电压的幅值由无功-电压控制环得到，其数学模型为

$$u=\frac{k_q}{s}(Q_{ref}-Q_e)+U_0 \tag{14}$$

式中：k_q 为无功-电压下垂系数；U_0 为参考电压。

得到逆变器输出端口电压的参考相位和幅值后再经过电压电流双闭环控制，输出逆变器的调制信号，实现 VSG 的基本功能。

在电网电压发生不平衡时，由于负序分量的影响，有功功率 P_e 和无功功率 Q_e 会出现二倍工频的波动。然而，VSG 控制系统的惯性效应、积分控制特性使得功率环输出的相位角 θ 和幅值 u 变化较为缓慢，能够有效滤除高频波动。因此，尽管功率存在二倍工频的波动，经 VSG 功率环输出的参考电压相位和幅值几乎不受影响，避免了进一步加剧电网的不稳定性。

3.2 电压不平衡下的 VSG 波动抑制策略

在分析现有 VPCR 功率波动抑制原理时，其控制对象为基于锁相环的跟网型逆变器，采用的是单电流环架构并且电流参考值 i_{dref}、i_{qref} 预设置为固定常数，这使其在电压跌落场景中无需调整控制参数即可维持输出三相电流平衡，在此基础上仅需引入虚拟相电流增益 k_i 便能实现抑制波动。然而基于 VSG 的构网型逆变器并不依赖锁相环同步，i_{dref}、i_{qref} 也非预设固定值，其控制结构中并不具备调节负序电流及抑制功率波动的能力。具体而言，跟网型控制下 VPCR 技术所依赖的固定电流参考值在构网型 VSG 系统中并不存在，电压环的输出特性直接影响电流参考的生成，而原始的电压环设计并未考虑电网电压不平衡的补偿需求。为此本文提出 1 种改进方案：首先通过调整电压环的输出特性使其在电网电压不平衡时仍能输出恒定电流参考值，从而为 VPCR 技术提供适配的应用条件；在此基础上，将跟网型 VPCR 的抑制机制引入构网型 VSG 系统，最终形成完整的功率波动抑制策略。这一方法的逻辑核心在于，通过电压环的主动修正弥补构网型逆变器与跟网型逆变器的部分控制差异，使现有跟网型 VPCR 技术得以在构网型 VSG 控制框架下有效应用。

根据同步发电机定子电气方程，忽略滤波电容 C 的作用，则可以建立逆变器输出端口电压与电流的关系式为

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}=-R\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}}-L\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}}}{\mathrm{d}t}+u_{\mathrm{gabc}} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 为 VSG 功率环输出电压幅值相位合成的三相电压；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{gabc}}$ 为三相电网电压；L、R 分别为从逆变器到电网之间的总电感和总电阻。

将 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 进行 dq 分解，可得到 dq 坐标系下电压与电流关系式为

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}i_{d\mathrm{ref}}\\ i_{q\mathrm{ref}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{Y}\left[\begin{pmatrix}u_d\\ u_q\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}u_{\mathrm{g}d}\\ u_{\mathrm{g}q}\end{pmatrix}\right]\\ \boldsymbol{Y}=\dfrac{1}{R^2+X^2}\begin{bmatrix}R & X\\ -X & R\end{bmatrix}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$ 为 dq 坐标系下的电流指令值；u_d、u_q 分别为 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 的 dq 轴分量；$u_{\mathrm{g}d}$、$u_{\mathrm{g}q}$ 为电网电压的 dq 轴分量；$\boldsymbol{Y}$ 为阻抗矩阵；X 为感抗，$X=\omega L$。

根据 VSG 功率环得到恒定的参考电压相位角 θ 及幅值 u，合成逆变器侧三相参考电压 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$，将 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 进行 dq 分解得到 u_d、u_q，由于 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}}$ 为三相平衡电压，只有正序分量，因此此时 dq 轴电流指令值的计算结果主要由电网电压的 dq 轴分量 $u_{\mathrm{g}d}$、$u_{\mathrm{g}q}$ 决定。当电网电压不平衡时，负序分量的存在使得 $u_{\mathrm{g}d}$、$u_{\mathrm{g}q}$ 中出现交流分量，进而引发逆变器输出电流的不平衡。

仍以电网 a 相电压发生电压跌落且跌落比为 k_{a} 为例($0<k_{\mathrm{a}}<1$)，为补偿电压跌落对电流指令值的影响，引入虚拟相电压增益 k_u 对采样电压进行幅值调整，此时补偿后的电网电压为

$$\begin{cases}u_{\mathrm{ga}}^{\mathrm{v}}=(k_{\mathrm{a}}/k_u)U\cos(\omega t)\\ u_{\mathrm{gb}}=U\cos(\omega t-2\pi/3)\\ u_{\mathrm{gc}}=U\cos(\omega t+2\pi/3)\end{cases} \tag{17}$$

式中，$u_{\mathrm{ga}}^{\mathrm{v}}$ 为补偿的 a 相电网电压。

将其变换至 dq 坐标系可得

$$\begin{cases}u_{\mathrm{g}d}^{\mathrm{v}}=\dfrac{\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}+2}{3}U-\dfrac{1-\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}}{3}U\cos(2\omega t)\\ u_{\mathrm{g}q}^{\mathrm{v}}=\dfrac{1-\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}}{3}U\sin(2\omega t)\end{cases} \tag{18}$$

将式(18)代入式(16)可得

$$\begin{bmatrix}i_{d\mathrm{ref}}\\ i_{q\mathrm{ref}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{Y}\begin{bmatrix}u_d-\dfrac{\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}+2}{3}U-\dfrac{1-\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}}{3}U\cos(2\omega t)\\ u_q-\dfrac{1-\frac{k_{\mathrm{a}}}{k_u}}{3}U\sin(2\omega t)\end{bmatrix} \tag{19}$$

由式(19)可知，电流参考指令 $i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$ 受不对称电网电压影响含有二倍频波动分量，取 $k_u=k_{\mathrm{a}}$ 则可将其消除并得到恒定的 $i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$，k_u 的取值可根据电压跌落程度调整，再经电流内环控制及 SPWM 调制，则可使逆变器输出三相平衡电流，在此基础上采用 VPCR 技术引入虚拟电流系数 k_i，使逆变器输出可控的不平衡电流，最终实现抑制功率波动的目的。采用 VPCR 补偿后的不平衡电流即可表示为式(9)的形式。

图 4 为虚拟电压电流调节策略应用原理，分别对电网电压、电流采样后引入增益系数 k_u、k_i，获得补偿后的虚拟电压、虚拟电流 dq 值输入电压、电流环中，即可最终实现抑制功率波动。

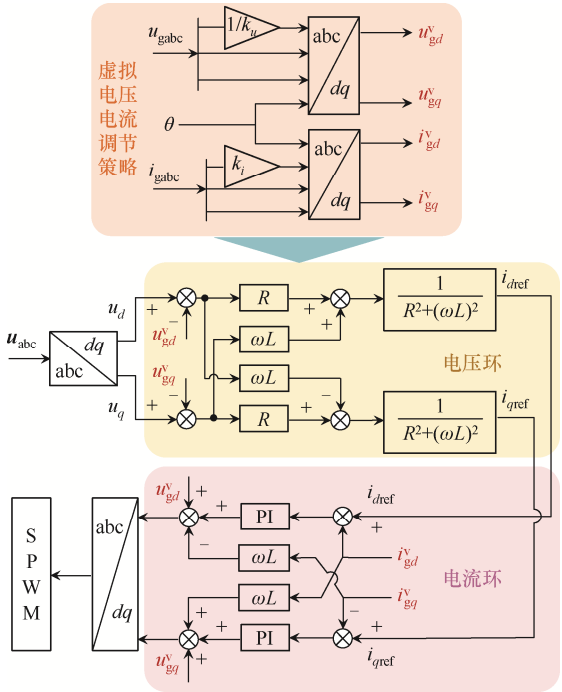


图 4　虚拟电压电流调节策略原理

Fig. 4 Principle of virtual voltage-current regulation strategy

需要注意的是，改进策略中的虚拟电压系数仅对电流参考指令的计算关系式起作用，对主电路中的不平衡电网电压并无影响。虚拟电压系数 k_u 和虚拟电流系数 k_i 并不改变VSG控制结构和控制参数，其取值均与电网电压跌落比一致，k_u 的引入为 k_i 创造了合适的应用条件，二者共同作用实现了构网型 VSG 逆变器在不平衡电网电压下的功率波动抑制。面对两相、三相电压跌落的场景仍可采用类似方法。这种改进策略既保留了 VPCR 技术控制结构简洁的优势，又解决了构网型逆变器与跟网型 VPCR 技术的适配性问题，为电网不平衡下的构网型 VSG 逆变器稳定运行提供了可行的技术路径。

4 实验验证

为了验证三相不平衡下虚拟电压电流调节策略在构网型 VSG 逆变系统中对于并网侧功率波动的抑制能力，本节分别通过 RT-LAB 实验平台和硬件平台进行实验。

4.1 RT-LAB 实验结果

在 RT-LAB 平台中，采用 OP5600 实时仿真器配置 RedHat Linux 实时操作系统，RT-LAB 实验平台整体架构如图 5 所示。

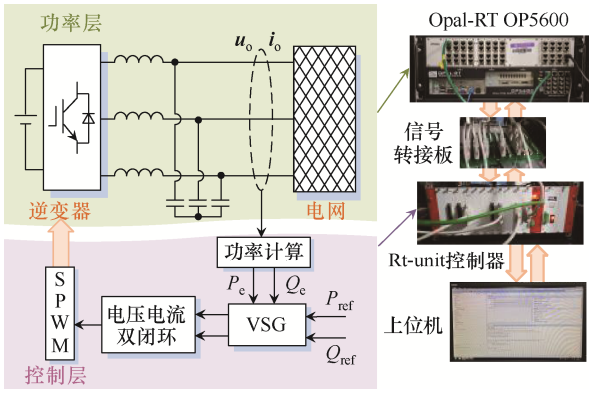


图 5 RT-LAB 实验平台结构

Fig. 5 Structure of RT-LAB experimental platform

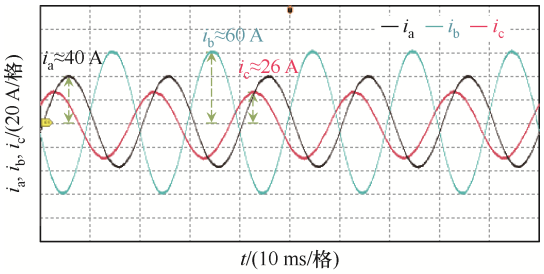
RT-LAB 实验中采用第 3 节图 2 所示拓扑，相关实验参数见表 1。

根据表 1 的参数设置 a 相电压幅值跌落至 0.8 p.u.，b、c 两相保持额定值不变，构建单相电压跌落实验工况，得到传统 VSG 控制方式下逆变器输出的三相电流与功率波形如图 6 所示。从图中可知，电网电压不平衡使得逆变器输出的三相电流波形发生显著畸变，各相电流的相位和幅值均呈现不对称特性，b 相电流幅值最高为 60 A，c 相电流幅值最低为 26 A。同时有功功率产生二倍频波动，波动幅度 $\Delta P \approx 3$ kW。

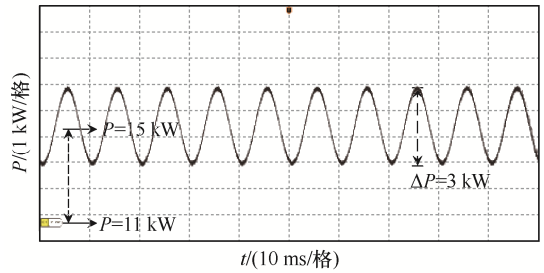
表 1 RT-LAB 实验参数

Tab. 1 Parameters of RT-LAB experiment

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	700
电网电压 u_g/V	311
滤波电感 L/mH	3
电阻 R/Ω	0.1
有功功率参考值 P_{ref}/kW	15
无功功率参考值 Q_{ref}/kvar	0
a 相电压跌落比 k_a	0.8
b 相电压跌落比 k_b	1.0
c 相电压跌落比 k_c	1.0



(a) 传统VSG输出电流波形



(b) 传统VSG输出功率波形

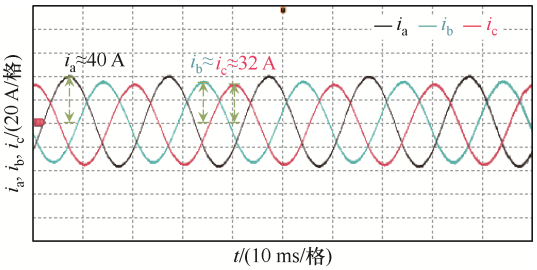
图 6 电压不平衡下传统构网型 VSG 逆变器输出波形

Fig. 6 Output waveforms of traditional grid-forming VSG inverter under voltage imbalance

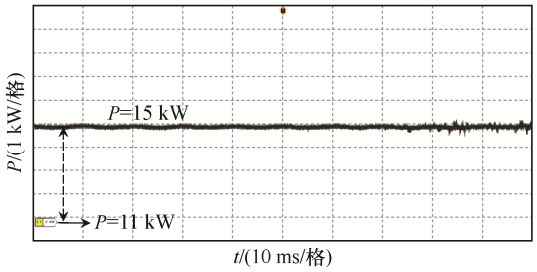
图 7 为应用改进策略后的构网型 VSG 逆变器输出波形。

如图 7 所示，在 a 相电压幅值跌落至 0.8 p.u. 的实验工况下，采用本文提出的虚拟电压电流调节

策略的 VSG 逆变器输出波形验证了控制策略的有效性。实验中虚拟相电压增益 k_u 和虚拟相电流增益 k_i 取值与 a 相电压跌落比相等，即取 0.8。从图中可知，逆变器输出的三相电流呈现出与电网电压跌落相适配的可控不对称特性，电压跌落相电流(a 相)幅值得到补偿，三相电流相位恢复对称。此时，逆变器并网有功功率基本恢复稳定，波动抑制效果明显。



(a) 改进后VSG输出电流波形



(b) 改进后VSG输出功率波形

图 7　电压不平衡下改进构网型 VSG 逆变器输出波形

Fig. 7 Output waveforms of improved grid-forming VSG inverter under voltage imbalance

分别对逆变器采用虚拟电压电流调控策略及正负序分离策略进行对比，得到逆变器输出功率波形对比如图 8 所示。

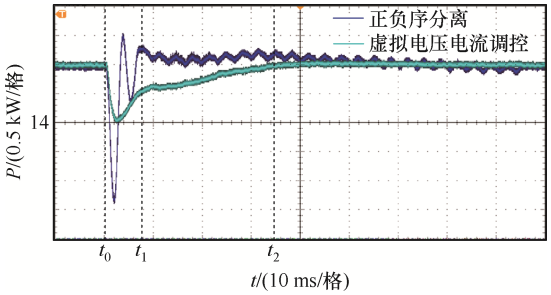


图 8　不同功率波动抑制策略效果对比

Fig. 8 Comparison of effect under different power fluctuation suppression strategies

实验中设置 t_0 时刻发生电网单相电压跌落(a 相电压跌落至 0.8 p.u.)。从图中可知，发生电压跌落后，采用正负序分离控制方法的逆变器输出功率振荡更大，功率最低点跌至约 12.7 kW，而采用本文所提虚拟电压电流调控策略的逆变器功率变化幅度更小，功率最低点跌至约 14 kW。t_1—t_2 时刻逆变器输出功率逐渐回至正常水平值 15 kW，采用本文所提虚拟电压电流调控策略的逆变器暂态恢复速度更快。t_2 时刻后逆变器输出功率基本稳定，采用虚拟电压电流调控策略对功率波动的抑制效果优于正负序分离控制。

因此，对比正负序分离控制和虚拟电压电流调控实验结果可知，虚拟电压电流调控策略在电网电压不平衡时暂态过程更平稳，恢复速度更快，最终对功率波动的抑制效果也更佳。

在实验中进一步设置两相电压跌落实验，其中 a 相电压跌落至 0.8 p.u.，b 相电压跌落至 0.6 p.u.，得到电压、电流及功率输出结果如图 9 所示。

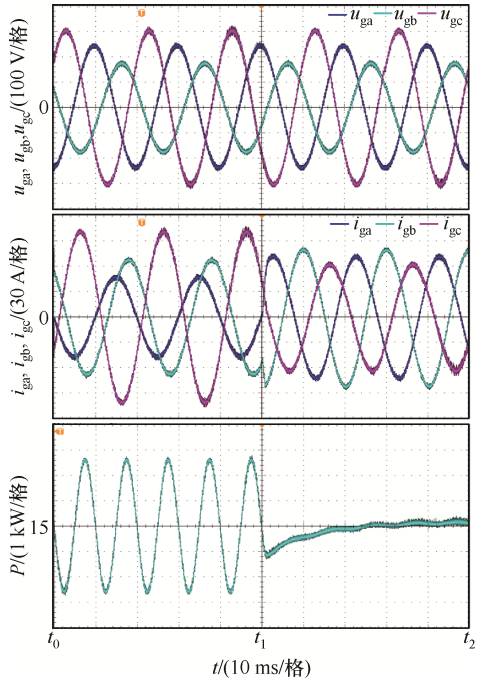


图 9　两相电压跌落实验波形

Fig. 9 Waveforms in two-phase voltage drop experiment

根据实验结果，可分为 t_0—t_1 时刻和 t_1—t_2 时刻 2 个阶段。t_0—t_1 时刻为两相电压跌落期间，尚未投入本文所提虚拟电压电流调控策略时，逆变器输出的三相电流严重不对称，输出功率包含二倍频

波动。t_1 时刻投入虚拟电压电流调控策略，逆变器输出三相电流得到有效控制，对应的 a 相、b 相电流得到补偿，逆变器输出功率波动抑制效果明显。

4.2 硬件实验验证

为进一步验证本文所提策略的有效性，搭建硬件实验平台如图 10 所示，实验设备包括①控制器上位机、②电源上位机、③Chroma61812 三相交流电源、④迈为 pCUBE 直流电源、⑤远宽 MT1050 控制器、⑥迈为 SiC1044 逆变器、⑦滤波电感和⑧信号连接器。

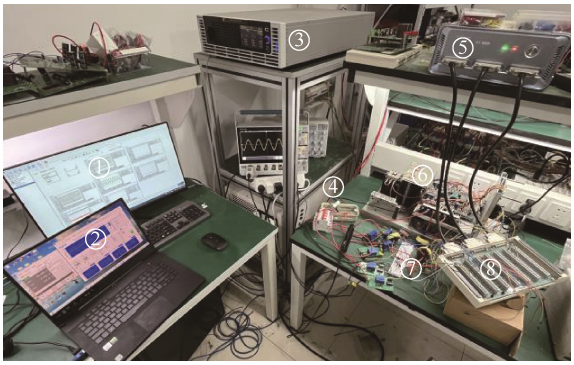


图 10 硬件实验平台结构

Fig. 10 Structure of hardware experimental platform

硬件实验参数见表 2。

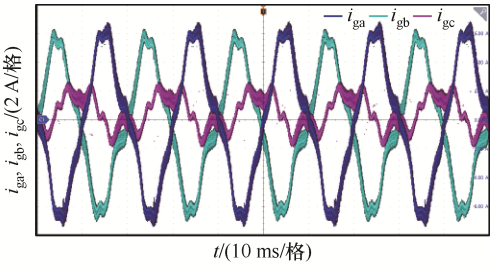
表 2 硬件实验参数

Tab. 2 Parameters of hardware experiment

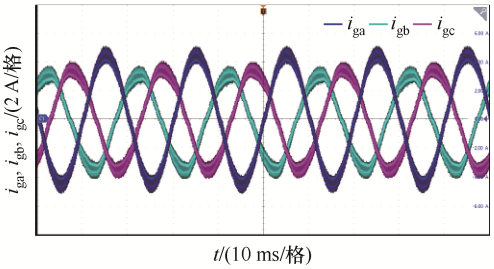
参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	70
电网电压 u_g/V	31.1
滤波电感 L/mH	2
电阻 R/Ω	0.01
有功功率参考值 P_{ref}/W	150
无功功率参考值 Q_{ref}/var	0
a 相电压跌落比 k_a	0.8
b 相电压跌落比 k_b	1.0
c 相电压跌落比 k_c	1.0

在硬件实验中同样设置 a 相电网电压跌落至 0.8 p.u.，其余两相不变。实验结果如图 11 所示。

图 11(a)为传统 VSG 控制方式下的逆变器输出电流波形，除了由电压跌落引起的电流幅值、相位变化以外，谐波含量也较高，正弦波形畸变严重；图 11(b)为采用虚拟电压电流调节策略后的逆变器输出电流波形，各相电流幅值接近正弦波，谐波含量显著降低，系统电能质量得到有效提升。



(a) 传统VSG输出电流波形

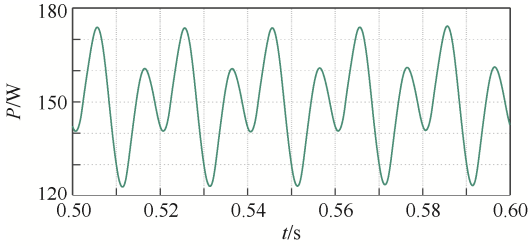


(b) 改进后VSG输出电流波形

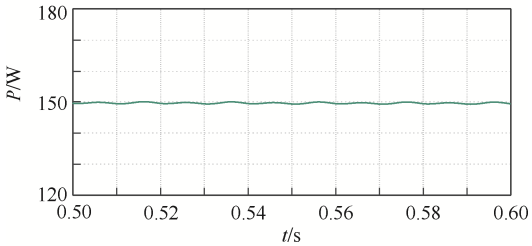
图 11 电压不平衡下逆变器输出电流波形对比

Fig. 11 Comparison of inverter output current waveforms under voltage imbalance

进一步对逆变器输出的电压和电流数据采样计算，获得控制策略改进前后的逆变器输出有功功率波形对比如图 12 所示。



(a) 传统VSG输出功率波形



(b) 改进后VSG输出功率波形

图 12 电压不平衡下逆变器输出有功功率波形对比

Fig. 12 Comparison of inverter output active power waveforms under voltage imbalance

图 12(a)为 a 相电压跌落后传统 VSG 控制方式下的逆变器有功功率波形，功率二倍频振荡明显，波动幅度ΔP≈50 W；图 12(b)为采用虚拟电压电流调节策略后的功率波形，二倍频波动几乎完全被消除。硬件实验所得结论充分验证了所提控制策略的有效性。

5　结论

本文针对电压不平衡场景下的 VSG 并网逆变器功率波动问题，结合传统跟网型 VPCR 技术的功率波动抑制原理，提出计及构网型 VSG 特征的虚拟电压电流调节控制策略。通过本文分析，可以得出以下结论。

(1)在电网电压不平衡时，VSG 逆变器的电压、电流双环控制效果不理想，逆变器并网电流波形畸变严重，仅借助现有的 VPCR 技术难以实现功率波动的有效抑制。

(2)跟网型逆变器经锁相环得到电压控制矢量，VSG 经功率环生成电压控制矢量，电压不平衡对 VSG 的电压控制矢量影响较小，通过在电压电流环引入虚拟调节系数，能够实现 VSG 的功率波动抑制。

(3)所引入的虚拟电压、电流调节系数与不平衡电压呈对应关系且计算简便，不影响现有 VSG 控制参数的整定，易于推广使用。

参考文献：

[1] 别朝红, 王则凯, 肖遥, 等. 双碳目标下新型电力系统发展展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 116-131.
Bie Zhaohong, Wang Zekai, Xiao Yao, et al. Outlook on the development of new power system under dual-carbon target [J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 116-131. (in Chinese)

[2] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
Shu Yinbiao, Zhao Yong, Zhao Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672. (in Chinese)

[3] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
Xie Xiaorong, He Jingbo, Mao Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475. (in Chinese)

[4] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.
Liu Xin, Guo Zhibo, Jia Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146. (in Chinese)

[5] 智明, 杨飞, 刘东亮, 等. 基于功率动态区域划分的自适应虚拟同步发电机控制策略[J/OL]. 电源学报, 1-13. (2024-08-14) [2025-03-28]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=OGEEvuKkrhYO07a4Yf0RmXVUA36FrX2R6XjZD1b5frPwsG0oKoaCtKncYLWFyhOCUxX7fwfKHzzDe07razS62cSvcdU2xhkCBXzAXtWXlWc2CY-p-PqL8ZzLGGlzhTOkKbFvvutqIYCWOA6BFZxfYT7mkiEjCOqn5gFHtNmjpG_CQFegEH-FNg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
Zhi Ming, Yang Fei, Liu Dongliang, et al. Adaptive virtual synchronous generator control strategy based on power dynamic region division [J/OL]. Journal of power supply, 1-13. (2024-08-14) [2025-03-28]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=OGEEvuKkrhYO07a4Yf0RmXVUA36FrX2R6XjZD1b5frPwsG0oKoaCtKncYLWFyhOCUxX7fwfKHzzDe07razS62cSvcdU2xhkCBXzAXtWXlWc2CY-p-PqL8ZzLGGlzhTOkKbFvvutqIYCWOA6BFZxfYT7mkiEjCOqn5gFHtNmjpG_CQFegEH-FNg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)

[6] 刘洋, 林英明, 余达, 等. 构网型虚拟同步化光储并网系统的频率支撑策略[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 152-161.
Liu Yang, Lin Yingming, Yu Da, et al. Frequency support strategy for grid-forming virtual synchronization PV-storage

grid-connected system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 152-161. (in Chinese)

[7] 涂春鸣, 杨万里, 肖凡, 等. 考虑故障限流的VSG暂态功角稳定控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 55-62, 94.
Tu Chunming, Yang Wanli, Xiao Fan, et al. Transient power angle stability control method of VSG considering fault current limitation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 55-62, 94. (in Chinese)

[8] 缪惠宇, 梅飞, 张宸宇, 等. 基于虚拟阻抗的虚拟同步整流器三相不平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3622-3630.
Miao Huiyu, Mei Fei, Zhang Chenyu, et al. Three phase unbalanced control strategy for virtual synchronous rectifier based on virtual impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3622-3630. (in Chinese)

[9] 韦徵, 姬秋华, 王伟, 等. 适用于电网不对称下的自同步电压源逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 124-131.
Wei Zhi, Ji Qiuhua, Wang Wei, et al. Control strategy of self-synchronous voltage source inverter for asymmetric power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 124-131. (in Chinese)

[10] 陈天一, 陈来军, 汪雨辰, 等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 904-909.
Chen Tianyi, Chen Laijun, Wang Yuchen, et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 904-909. (in Chinese)

[11] 万晓凤, 胡海林, 聂晓艺, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3573-3581.
Wan Xiaofeng, Hu Hailin, Nie Xiaoyi, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3573-3581. (in Chinese)

[12] 杨明, 高龙将, 王海星, 等. 电网不平衡下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 17-23.
Yang Ming, Gao Longjiang, Wang Haixing, et al. Coordinate control of power and current for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 17-23. (in Chinese)

[13] Chowdhury V R. Enhanced operation of a virtual synchronous machine under unbalanced grid voltage condition based on Lyapunov energy function [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(2): 589-602.

[14] Andrew E T, Ahmed K H, Holliday D. A new model predictive current controller for grid-connected converters in unbalanced grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9175-9186.

[15] Mohapatra S R, Agarwal V. Model predictive control for flexible reduction of active power oscillation in grid-tied multilevel inverters under unbalanced and distorted microgrid conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1107-1115.

[16] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下虚拟同步机的多模式协调策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4274-4285.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. Multi-mode coordination control of virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4274-4285. (in Chinese)

[17] 赵晨聪, 刘军, 谢宙桦. 电网不平衡时电流限制的风电并网变流器功率/电流灵活控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 137-148.
Zhao Chencong, Liu Jun, Xie Zhouhua. Flexible power/current control of wind power grid connected converter with current limitation under unbalanced grid voltage [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 137-148. (in Chinese)

[18] Zarei S F, Mokhtari H, Ghasemi M A, et al. Control of grid-following inverters under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 184-192.

[19] 王仰铭, 孙丹, 年珩, 等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9):

3368-3374.

Wang Yangming, Sun Dan, Nian Heng, et al. Extended power control strategy of self-synchronized virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3368-3374. (in Chinese)

[20] Tang Chengyu, Jheng J H. An active power ripple mitigation strategy for three-phase grid-tied inverters under unbalanced grid voltages [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 27-33.

[21] Liu Ao, Hou Chuanchuan, Zhu Miao, et al. DC-link power ripple mitigation of three-phase grid-tied inverters with virtual phase-current regulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12402-12413.

[22] Cai Yuxi, Hou Chuanchuan, Zhu Miao, et al. DC-link zero power fluctuation of grid-tied inverters: Implementation with two-phase virtual phase-current regulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(3): 2690-2699.

[23] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-297.

Liu Hui, Yu Siqi, Sun Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.(in Chinese)



刘家文

作者简介：

刘家文(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源并网技术。E-mail：y22203203@mail.shiep.edu.cn。

侯川川(1991—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：新能源并网技术。E-mail：chuanchuanhou@sjtu.edu.cn。

朱淼(1979—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：交直流混合系统，新能源并网控制。E-mail：miaozhu@sjtu.edu.cn。

龚逊东(1971—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：配电物联网研究。E-mail：15179622796@163.com。

杨晨(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：现代智慧配电网。E-mail：Yangchen@163.com。

(责任编辑：孙美菊)